敦煌月牙泉域地下水系统水文地球化学特征分析

李平平[1]， 盖 楠[2]， 王晓丹[3]， 杨俊仓[1]

（1. 甘肃省地下水工程及地热资源重点实验室，甘肃省地质环境监测院，甘肃 兰州 730050；2. 国家地质实验测试中心，自然资源部生态地球化学重点实验室，北京 100037；3. 甘肃省地质矿产勘查开发局水文地质工程地质勘察院，甘肃 张掖 734000）

摘 要：选择河西走廊西端的月牙泉域作为研究对象，通过样品采集测试，对研究区内的水化学特征、环境同位素和水文地球化学过程进行了系统分析。结果表明：大气降雨（包括冰川融水）形成的出山河水是区内潜水的主要补给来源，二者存在密切的成因联系，局部地区受断裂构造或越流影响并受祁连山前深部地下径流侧向补给；党河灌区地下水的蒸发作用微弱，以人工开采为主要排泄方式，其他浅层地下水以蒸发为主要排泄项；地下水化学成分的演化受到碳酸和硅酸盐岩溶滤作用的影响；岩盐、石膏和硅酸盐岩的溶解作用、方解石和白云岩的沉淀作用以及蒸发作用是控制地下水盐分的主要因素，且在流域水循环过程中存在不同程度的混合作用。研究结果可为月牙泉生态保护与恢复提供科学依据。

关键词：敦煌月牙泉；地下水系统；水化学特征；环境同位素

月牙泉在敦煌市南5 km处，沙山所包围。月牙泉形状酷似一弯新月[1-2]，形成距今约12 ka[3]。月牙泉的成因到目前为止仍然是一个谜，诸多研究者看法不一[4-5]，无科学定论。20世纪60年代前，月牙泉水位动态变化很小，从70年代开始[1]，月牙泉水位受到人类活动的影响，开始急剧下降，到2008年左右才稳定并开始缓慢上升。月牙泉水位的下降导致几度露底，引起国家有关部门、研究者的关注和重视，对月牙泉进行了恢复治理，研究者针对月牙泉人工回灌[6]、水位下降应急治理[7]和恢复补水工程[8]等治理方面进行了系统研究[9]。

近年来，月牙泉的变迁备受研究者关注，先后发表论文达40余篇[10]。尹念文等[4]通过区域地质调查、于漫等[11]通过地下水流场和含水介质，分析了月牙泉的成因；黎涛等[12]通过野外示踪试验和地下水调查采样，分析了月牙泉域沉积环境及泉湖水化学成因；杨俊仓等[13]通过示踪试验，分析了月牙泉域地下水流向和沙含水层渗透速度；丁宏伟等[2]、施锦等[14]、李平平等[1]通过数据资料，分析了月牙泉水环境退化的原因；张克存等[15]、安志山等[16]通过监测资料，分析了月牙泉景区风沙输入及沙山动态变化特征；庞营军等[17]通过监测数据，分析了月牙泉景区沙丘粒度特征。有关月牙泉域地下水系统水文地球化学特征的研究较少。本文在前人研究的基础上，通过样品采集测试，对月牙泉域内的水化学特征、环境同位素[18]和水文地球化学过程进行了系统分析。研究结果不仅丰富了月牙泉域的水文地球化学特征研究，也为月牙泉生态保护与恢复提供科学依据。

1 研究区概况

敦煌市位于河西走廊最西端的甘、青、新三省交界处，东临瓜州县，南与肃北县和阿克塞县相接，西面和北面与新疆接壤。敦煌总面积3.12×10^4 km^2[19]，其中，绿洲面积0.14×10^4 km^2，仅占4.5 %，其余区域为戈壁和沙漠。

研究区内党河为入境河流，南向东北流，党河全长390 km，汇水面积1.69×10^4 km^2，在敦煌盆地内流程仅50 km左右，多年平均流量为2.96×10^8 m^3。

收稿日期：2023-08-24； **修订日期**：2023-12-04
基金项目：国家重点研发计划课题（2019YFC1805105）；甘肃省地下水工程及地热资源重点实验室开放基金项目（201902）
作者简介：李平平（1990-），男，水工环地质高级工程师，主要从事水文水资源调查评价. E-mail: Xiaopingcumt@163.com
通讯作者：盖楠. E-mail: gainan@mail.cgs.gov.cn

西水沟位于研究区东部,南向北流,平均流量为 $410.23\times10^4\ m^3\cdot a^{-1}$。

研究区属敦煌盆地的北盆地,地下水在洪积扇边缘埋深大于20 m,向东北地下水埋深由深变浅,到月牙泉、杨家桥一带水位小于10 m。地下水主要接受党河渠系水和田间灌溉水入渗补给[20],由西南向北东方向径流[2,13],在地形低洼处出露[1]并形成月牙泉,月牙泉少量蒸发外补给地下水,潜水蒸发、开采及侧向流出[2]为主要排泄项。基岩山前和洪积扇地带地下水类型为单一的潜水含水层,渗透系数53.6~61.36 $m\cdot d^{-1}$,给水度0.1~0.25;下游细土平原区地下水类型为潜水-承压水,渗透系数0.39~21.58 $m\cdot d^{-1}$,给水度0.05~0.2。

2 样品采集与测试

2.1 样品采集

于2018年对研究区内的地表水和地下水进行了系统采集,共采集水样52件(图1),其中,地下潜水43件、泉湖水1件、河水7件和水库水1件。采样瓶采用2个50 mL聚乙烯瓶,一瓶中加入浓 HNO_3,另一瓶中不加任何试剂。另外,采集一瓶500 mL原样用于采样现场碱度测定。氢氧同位素样采用1000 mL棕色瓶,并进行密封保存,避免同位素交换以及分馏。

2.2 样品测试

pH、EC和溶解氧等在野外采用便携式测定仪[19](Hach LDOTM HQ10)现场测定,碱度采用酸碱滴定法测定[21-22]。阴离子 F^-、Cl^-、HPO_3^{2-}、SO_4^{2-}、NO_3^- 等采用色谱仪测定[21](Dionex, DX-120,美国),K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Fe^{3+}、Cu^{2+}、Na^+、Ba^{2+}、Sr^{2+}、Pb^{2+}、Mn^{2+}、Zn^{2+}、Cr^{2+}、Ag^+等[23-24]采用ICP-AES进行测定(IRIS Intrepid Ⅱ XSP,美国),这些均在中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室完成。氢氧同位素[25]分析在河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室完成。Sr同位素[26]分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。

3 结果与分析

3.1 水化学特征分析

3.1.1 参数统计分析 根据水样的pH、溶解性总固体(TDS)和常量离子指标分析可知,党河上游至党河水库水样pH值变化不大,为8.38~8.57的偏碱性水,平均值为8.51;除了党河上游河水样的pH值稍低,为8.38外,其余均为8.5左右。泉湖水及其监测孔地下水pH为7.17~9.28的弱碱性至偏碱性水,其中,距月牙泉较近的5个监测孔pH值较大,变化范围为8.54~9.28;距月牙泉较远的监测孔pH值较低,变化范围为7.17~7.95;泉湖水的pH值介于两者之间。水库下游及灌区的地下水均为pH值为7.25~8.15的弱碱性水,平均pH值变化不大,沿党河河道地下水的pH值高于泉湖北灌区地下水,分别为7.74

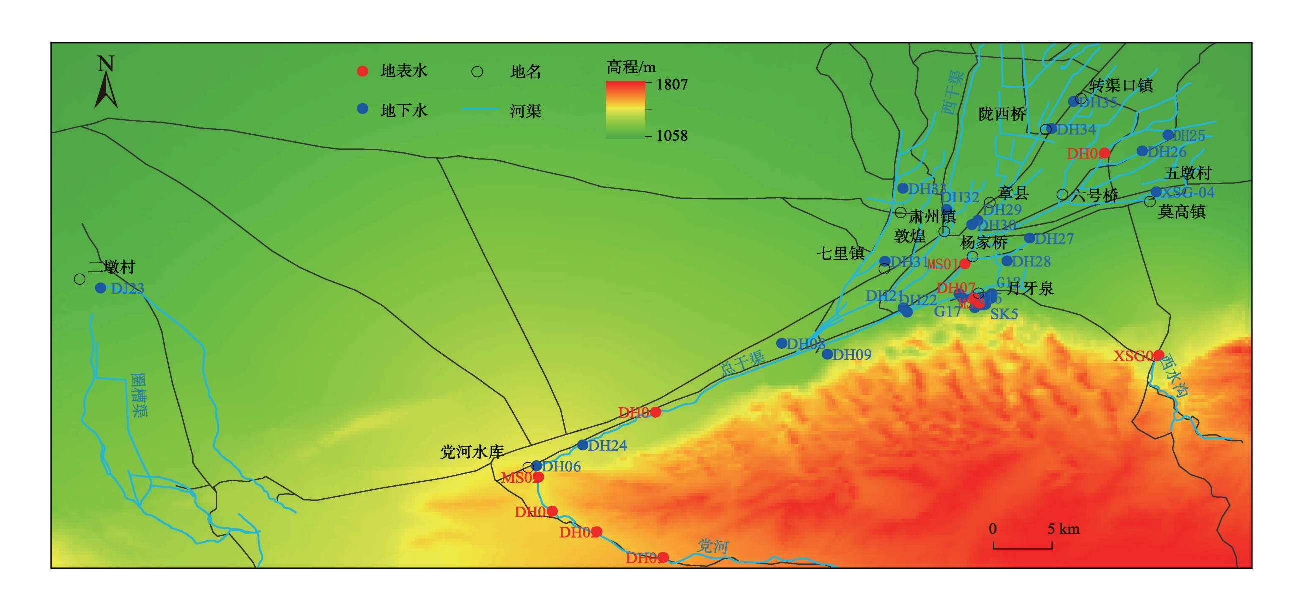


图1 研究区采样点分布

Fig. 1 Distribution map of sampling points in the study area

和7.50。

党河上游至党河水库，河水的TDS呈逐渐增大的趋势，变化范围为218.82~367.82 mg·L^{-1}，平均值为271.34 mg·L^{-1}。距月牙泉较近的监测孔TDS较低，变化范围为246.89~548.7 mg·L^{-1}，距月牙泉较远的监测孔TDS较高，变化范围为767.56~1646.96 mg·L^{-1}。水库下游及灌区地下水的TDS含量较大，变化范围为831.94~1758.3 mg·L^{-1}。这与受古地理环境、沉积区地层含盐量、灌溉和渠道渗漏的影响有关。

党河上游至党河水库，除NO_3^-变化较小之外，其余离子含量与TDS变化趋势相似(图2)，溶解氧含量沿河水流向逐渐降低。泉湖暴露于地表，蒸发浓缩作用较强[27]，其TDS、SO_4^{2-}、HCO_3^-、Cl^-、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Na^+、K^+含量明显高于周围地下水中的含量，但却低于相距较远的监测孔地下水中的含量。水库下游及灌区地下水中的含量相对较高，这与蒸发强烈有关。

3.1.2 水化学类型分析 由研究区地下水Piper三线图(图3)可知，研究区水样主要阴阳离子组成呈一定的规律性。

党河水中的阴离子HCO_3^-和SO_4^{2-}占优势地位，阳离子Ca^{2+}和Mg^{2+}占优势地位，分布于Piper三线图中菱形的左上部，党河上游水样和下游干渠水样均为HCO_3·SO_4–Ca·Mg型水。泉湖水样为SO_4·HCO_3·Cl–Mg·Ca·Na型水，西水沟河水样为Cl·HCO_3–Na·Mg型水。

月牙泉周围监测孔地下水样中阴离子HCO_3^-占优势地位，SO_4^{2-}和Cl^-次之，阳离子以Mg^{2+}和Na^+为主[28]，Ca^{2+}次之，水化学类型复杂，主要为HCO_3·Cl–Mg·Na型。月牙泉北部较远的监测孔地下水样中阴离子HCO_3^-占优势地位，Cl^-次之，SO_4^{2-}极低，阳离子以Mg^{2+}为主，Na^+和Ca^{2+}含量较低，水化学类型主要为HCO_3–Mg型。

二墩村灌溉井水化学类型为SO_4·Cl–Na·Mg型。五墩村地下水主要来自西水沟河水的补给，水化学类型为SO_4·Cl–Mg型。其他地下水样水化学类型相近，阴离子主要以SO_4^{2-}和HCO_3^-为主[28]，Cl^-次之，阳离子中Mg^{2+}和Na^+占主导地位，Ca^{2+}百分含量较低，水化学类型主要为SO_4·HCO_3·Cl–Mg·Na和HCO_3·SO_4–Mg·Na型。

3.2 环境同位素分析

3.2.1 氢氧同位素组成特征 为了分析研究区水循环过程，将采集的所有地表水与地下水样投影在δD-δ^{18}O关系图上(图4)。由图4可以看出，地表水、地下水的稳定同位素D和^{18}O均汇集于我国雨水线和西北地区雨水线附近，表明地表水、地下水均源自大气降水。

河水样位于当地雨水线的左上方附近，结合该区极端干旱的气候特征，认为该区的地表水、地下水主要补给来源于祁连山西段北山的大气降水(包括冰川水)和地下径流侧向补给，这与我国西北许多地区相似。

沿地下水径流途径，从党河水库下游河道附近地下水、泉湖附近监测孔地下水至灌区地下水，δ^{18}O

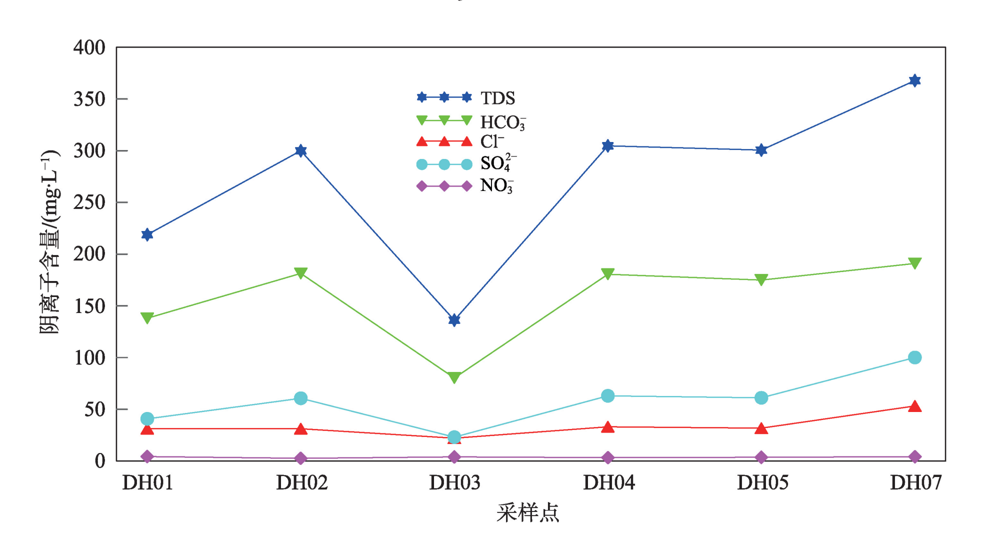


图2 地表水中阴离子含量变化

Fig. 2 Map of anion content change in surface water

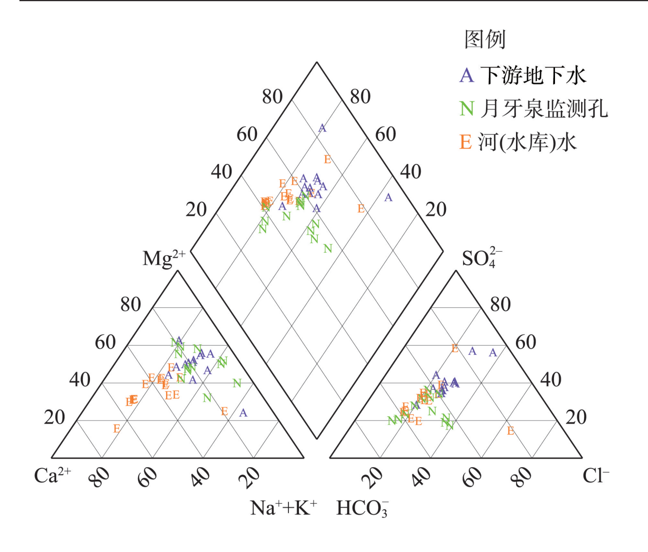


图3 研究区水样水化学Piper三线图

Fig. 3 Piper three-line diagram of water chemistry in the study area

和δD值变化不大，均分布在蒸发线y=3.73x−33.3左端附近，说明主要来源于党河水渗漏补给。月牙泉南侧监测孔地下水中的δD和δ^{18}O值较低，补给高程较高，且与党河上游采集的水样接近，说明主要来自山前地下径流。

3.2.2 地下水年龄分析 T为H的放射性同位素，半衰期为12.43 a，它与大气中的氧原子化合生成HTO水分子[29]，成为天然水的一部分，参与水循环过程，且不易发生沉淀和吸附。

党河上游水中T含量高达40 TU，说明该河水相当大部分可能为20世纪60—70年代冰雪的融水，或这个时期的降水补给地下水后排泄补给河水。而党河上游干流水中T含量为22 TU，与水库下游河道附近的地下水中的T含量基本一致，说明既有近期大气降水和冰雪融水，又存在小部分60—70年代补给的地下水。

泉湖西侧深150 m的监测孔地下水中T含量仅为11 TU，推测受泉湖南近10 a来大气降水补给的深部地下径流的影响。泉湖东南深380 m的监测孔地下水中T含量仅为20 TU，而泉湖北深30 m的监测孔地下水中T含量达30 TU。说明沿着地下水径流方向，从泉湖西南到东北，地下水的年龄逐渐变老，泉湖下游和北部地下水的更新速度较慢。

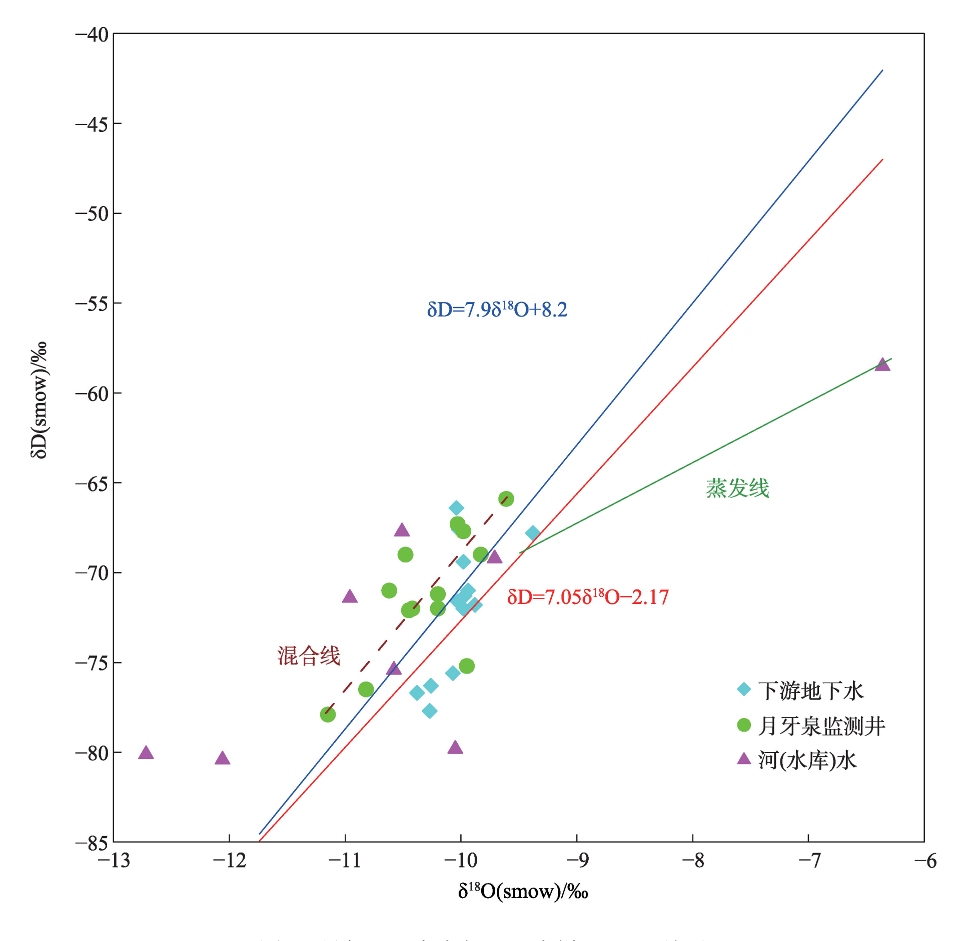


图4 研究区地表水与地下水样δD-δ^{18}O关系

Fig. 4 Relationship diagram of surface water and groundwater samples δD-δ^{18}O in the study area

位于灌区杨家桥乡和二墩村灌溉井地下水中T含量仅为14 TU，可能主要是来源于近10 a来大气降水补给的党河水；七里镇较深的灌溉井中T含量为23 TU，与水库下游河道附近的地下水以及下游灌区地下水中的T含量基本一致，说明既有近期大气降水，又存在小部分20世纪60—70年代补给的地下水。章县机井达到30 TU以上，说明部分罐区浅层地下水存在祁连山区大气降水和冰雪融水通过[30]深部基岩裂隙补给的情况。

3.2.3 Sr同位素组成特征 地下水中Sr的含量与$^{87}Sr/^{86}Sr$值之间的相关性较差，党河水库水下渗后与地下含水介质的水-岩作用是控制地下水中$^{87}Sr/^{86}Sr$值的主要因素。高$^{87}Sr/^{86}Sr$值的硅酸盐和低$^{87}Sr/^{86}Sr$值[31]的碳酸盐都是研究区内砂岩含水介质中重要的含Sr矿物，区内地下水中的平均$^{87}Sr/^{86}Sr$值为0.712083，这同时也说明地下水化学成分的演化受到碳酸和硅酸盐岩溶滤作用的影响[32]。

泉域附近地下水中$^{87}Sr/^{86}Sr$值相对较高[31]，均大于0.712100，而北部灌区和党河下游河道附近地下水中$^{87}Sr/^{86}Sr$值则相对稍低[31]，$^{87}Sr/^{86}Sr$值为0.712079，说明泉域附近含水层中硅酸盐含量较灌区高，地下含水介质中水化学的演化受$^{87}Sr/^{86}Sr$值较高的铝硅酸盐岩矿物溶滤作用的影响[31]。

3.3 水文地球化学过程分析

水中的Na^+和Mg^{2+}的含量与TDS呈显著正相关，随着TDS的升高而增大。与Na^+和Mg^{2+}对比，地下水中Ca^{2+}的变化和TDS的增加没有很显著的关系，当TDS > 1000 mg·L^{-1}时，随着TDS的升高，Ca^{2+}的浓度降低，这主要是由于水中的方解石和白云石处于过饱和状态。

以化学性质保守的Cl^-作为参考对象进行离子分析，TDS < 400 mg·L^{-1}时，研究区内水中的Cl^-/SO_4^{2-}随TDS的增加而降低；TDS > 400 mg·L^{-1}时，Cl^-/SO_4^{2-}相对稳定，SO_4^{2-}和Cl^-浓度同时增加说明是大陆盐化作用的影响。SO_4^{2-} < 2.5 mg·L^{-1}时，研究区内水的SO_4^{2-}/Cl^-随SO_4^{2-}的增加而增大；而SO_4^{2-} > 2.5 mg·L^{-1}时，SO_4^{2-}/Cl^-相对稳定，说明硫酸盐溶解不是造成地下水咸化的重要作用。

研究区大部分水样的$(Ca^{2+}+Mg^{2+})/(HCO_3^- + SO_4^{2-})\approx 1$，表明碳酸盐矿物和硅酸盐矿物的溶解是该区地下水化学形成的主要作用[33]。党河灌区部分地下水样品的$(Ca^{2+}+Mg^{2+})/(HCO_3^- + SO_4^{2-}) < 1$，分析表明，地下水中的离子成分主要来源于硅酸盐矿物的溶解[34]，或发生了较强的离子交换作用。

4 讨 论

从党河上游至下游灌区，水中的HCO_3^-含量逐渐下降，SO_4^{2-}和Cl^-含量逐渐上升，但SO_4^{2-}增加的幅度大于Cl^-（图5）；从党河上游开始向下游，Ca^{2+}含量先逐渐下降，至泉湖后基本保持不变，Mg^{2+}和Na^+

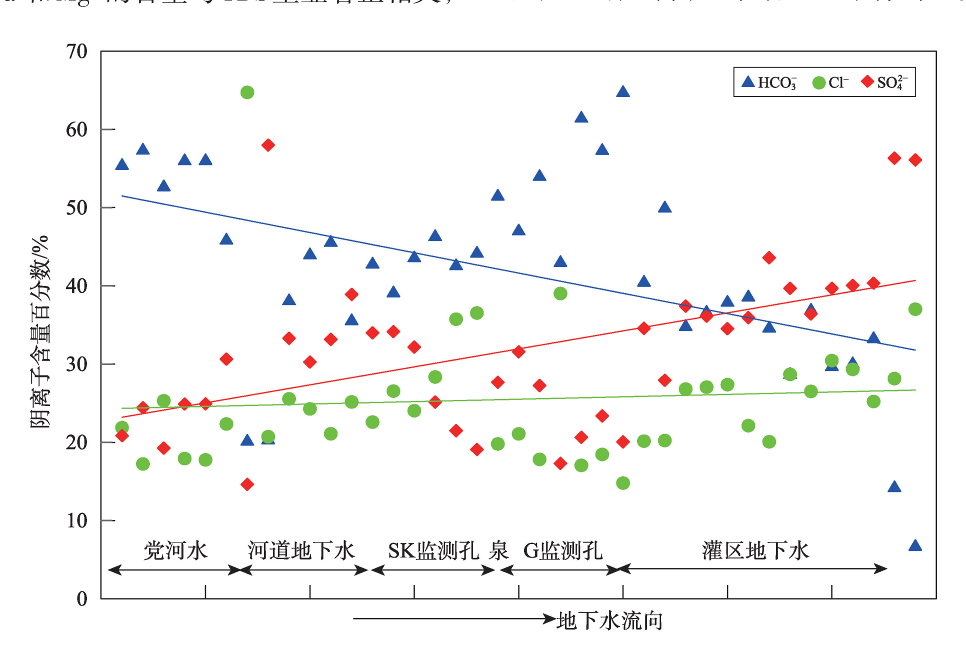


图5 沿径流方向地下水中阴离子含量百分数变化

Fig. 5 Percentage change in content of anions in groundwater along the runoff direction

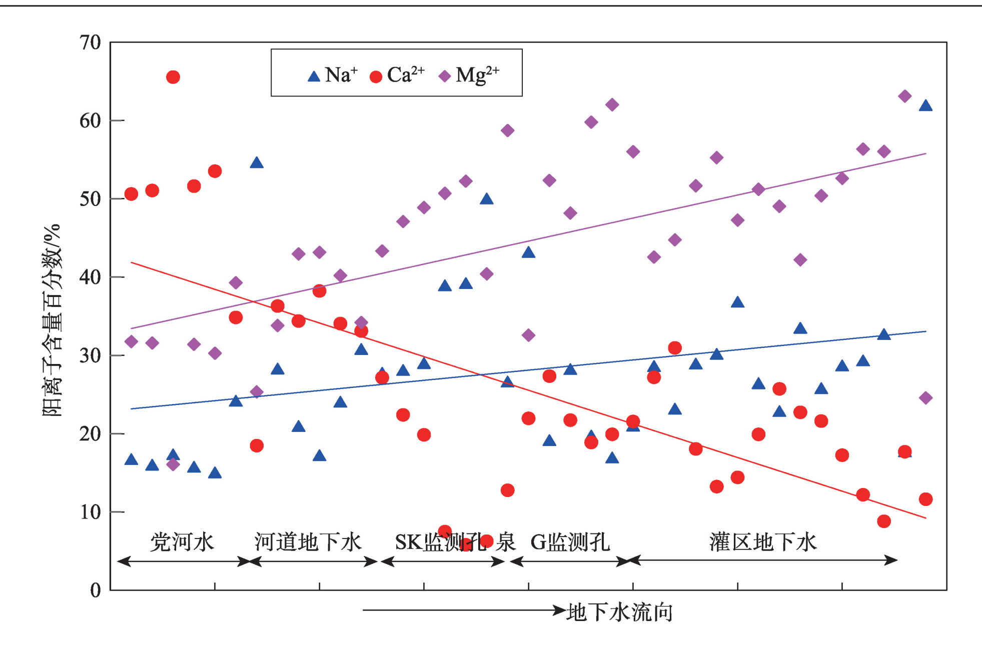


图6 沿径流方向地下水中阳离子含量百分数变化

Fig. 6 Percentage change in content of cations in groundwater along runoff direction

含量逐渐上升,但Mg^{2+}增加的幅度稍大于Na^{+}(图6)。所以,水化学类型也由党河水的HCO_3·SO_4–Ca·Mg型→党河水库下游河道HCO_3·SO_4–Mg·Ca型→泉湖及周围观测孔的HCO_3·SO_4·Cl–Mg·Na型→灌区地下水的SO_4·HCO_3·Cl–Mg·Na型。

根据区域环境背景,研究区地下水的盐化可能有两种原因:强烈蒸发蒸腾和盐类矿物的溶滤。由研究区水样中$\delta^{18}O$-TDS(图7)和δD-TDS(图8)关系图可知,当TDS < 500 mg·L^{-1}时,党河水、水库下游的河道附近的地下水、距离泉湖较近的监测孔以及泉

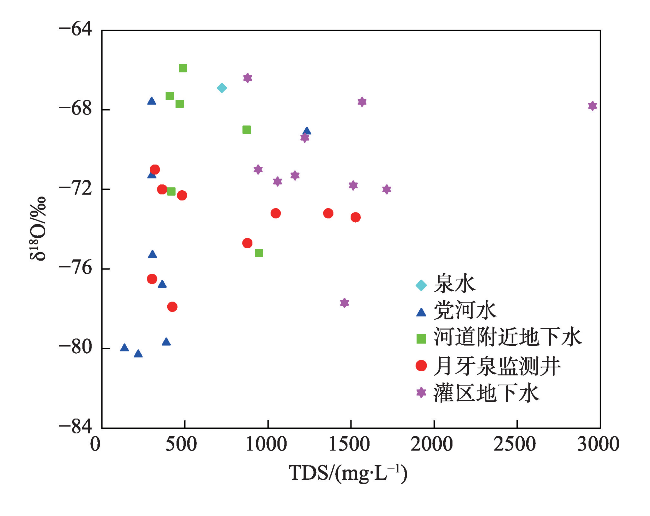


图8 研究区水样中δD与TDS关系

Fig. 8 Relationship between δD and TDS in water samples in the study area

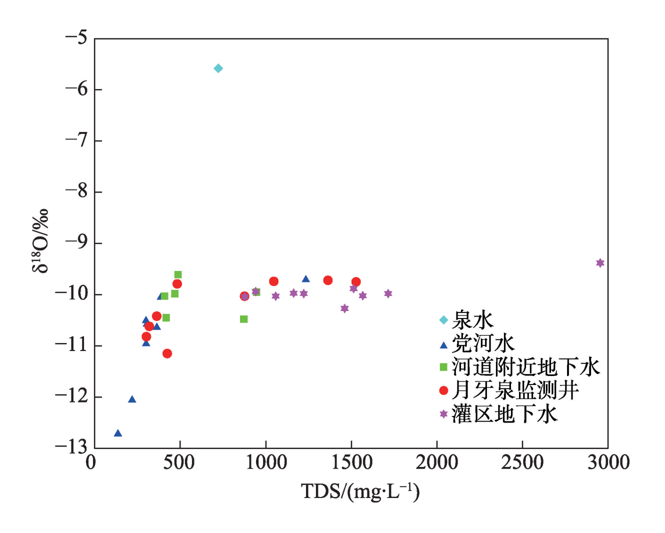


图7 研究区水样中$\delta^{18}O$与TDS关系

Fig. 7 Diagram of $\delta^{18}O$ and TDS in water samples in the study area

湖水样中的$\delta^{18}O$和δD值随着TDS上升迅速增大,说明蒸发作用影响较大。而距离泉湖较近的监测孔以及灌区的地下水样则位于斜率为零的水平直线附近,TDS从接近1000 mg·L^{-1}急剧升高到接近2500 mg·L^{-1}以上,$\delta^{18}O$和δD值则与上游地表和地下水相比变化不大。显然,这类盐分的大量增加很难仅仅归因于蒸发作用,而主要是由于溶滤作用[35]和拒盐植物蒸腾所致,蒸发作用影响微弱。

党河水的氘过量值(*d*)变化在8.58‰~21.76‰,平均值为14.8‰;区内地下水的*d*值变化在5.82‰~14.86‰,均值为9.95‰;而泉湖水的*d*值为−7.51‰。

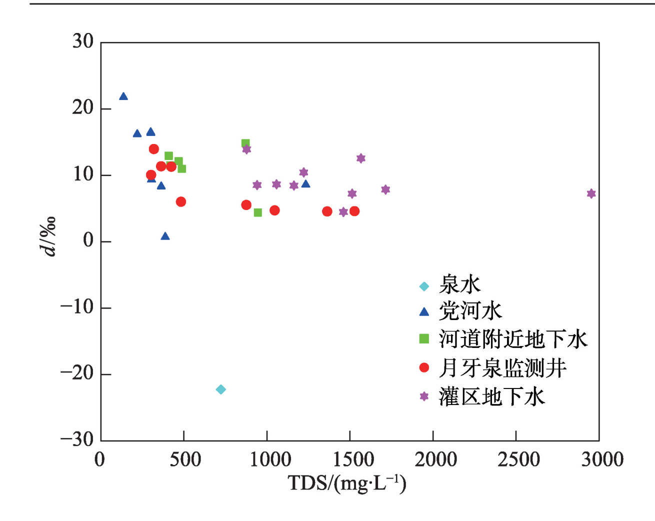


图9 地下水中氘过量(*d*)与TDS的关系

Fig. 9 Relationship between deuterium excess (*d*) in groundwater and TDS

地下水的TDS随氘过量值(*d*)的减小而升高(图9),两者呈负相关,证明蒸发作用是导致重同位素富集的重要机制。与党河水、水库下游河道附近的地下水以及泉湖水相比,地下水盐化程度和*d*值的变化说明,党河灌区地下水的蒸发作用微弱,以人工开采为主要排泄方式,而其他地下水浅埋区以蒸发蒸腾为主要排泄方式。

HCO_3^-含量随Ca^{2+}、Mg^{2+}和TDS含量的增加而减小[36]。这主要原因是地下水在径流过程中[36],随TDS和pH值增加,Ca^{2+}与HCO_3^-生成碳酸钙,即方解石沉淀;但由于Ca^{2+}被除去,Mg^{2+}/Ca^{2+}比值升高[36],在碱度较高的条件下,碳酸钙可转化成白云石。

Na^+、SO_4^{2-}、Cl^-离子与TDS关系密切,这些溶质在高盐度下发生沉淀[37]。$Ca^{2+}+Mg^{2+}$主要受$CaCO_3$、$CaMg(CO_3)_2$及$CaSO_4\cdot 2H_2O$的溶解和沉淀作用的控制,并与来自斜长石和岩盐中的Na^+发生离子交换[37]。因岩盐与石膏均没有达到饱和,SO_4^{2-}与Cl^-含量分别由石膏与岩盐溶解产生[37]。HCO_3^-记录了上游河水对$CaMg(CO_3)_2$和$CaCO_3$的溶解。Na^+主要来源于岩盐溶解,损失则由于离子交换;Ca^{2+}、Mg^{2+}的损失或增加由$CaMg(CO_3)_2$、$CaSO_4\cdot 2H_2O$及$CaCO_3$提供。

5 结 论

通过对敦煌月牙泉域地下水水化学特征、环境同位素和水文地球化学过程进行研究,得出如下结论:

(1) 泉湖周围监测孔地下水pH为7.17~9.28的弱碱性至偏碱性水,泉湖水与党河水及其灌区地下水的水化学特征接近,与西水沟河水及其下游灌区地下水的水化学特征差别较大,显示泉湖水与党河的补给同源性。

(2) 水化学类型由党河水的$HCO_3\cdot SO_4$–$Ca\cdot Mg$型→党河水库下游河道$HCO_3\cdot SO_4$–$Mg\cdot Ca$型→泉湖及周围观测孔的$HCO_3\cdot SO_4\cdot Cl$–$Mg\cdot Na$型→灌区地下水的$SO_4\cdot HCO_3\cdot Cl$–$Mg\cdot Na$型。

(3) 研究区地下水氢氧稳定同位素总体特征一致,表明其起源一致。由大气降雨(包括冰川融水)形成的出山河水是区内潜水的主要补给来源,二者之间存在密切的成因联系,局部地区受断裂构造或越流影响接受祁连山前深部地下径流侧向补给。

(4) 地下水的TDS随氘过量值(*d*)的减小而升高,两者呈负相关,证明蒸发作用是导致重同位素富集的重要机制。党河灌区地下水的蒸发作用微弱,以人工开采为主要排泄方式,而其他地下水潜埋区以蒸发蒸腾为主要排泄方式。

(5) $\delta^{18}O$与Cl^-浓度关系、$\delta^{18}O$和δD与TDS关系、氘过量(*d*)与TDS关系以及Sr同位素表明,地下水化学成分的演化受到碳酸和硅酸盐岩溶滤作用的影响。岩盐、石膏和硅酸盐岩的溶解作用、方解石和白云岩的沉淀作用以及蒸发作用是控制地下水盐分的主要因素,且在流域水循环过程中存在不同程度的混合作用。

参考文献(References):

[1] 李平平, 王晓丹, 缪云腾, 等. 敦煌月牙泉湖近百年水位变化及其原因分析[J]. 地质论评, 2020, 66(6): 1619–1625. [Li Pingping, Wang Xiaodan, Miao Yunteng, et al. The change of water level and its causes in Crescent Lake in Dunhuang area in the last 100 years[J]. Geological Review, 2020, 66(6): 1619–1625.]

[2] 丁宏伟, 龚开诚. 敦煌月牙泉湖水位持续下降原因及对策分析[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(6): 74–77. [Ding Hongwei, Gong Kaicheng. Analyses of the reasons and countermeasures for the decline in the water level of the Crescent Spring Lake near Dunhuang[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2004, 31(6): 74–77.]

[3] 许朋柱, 秦伯强. 太湖湖滨带生态系统退化原因以及恢复与重建设想[J]. 水资源保护, 2002, 18(3): 31–36. [Xu Pengzhu, Qin Boqiang. Degeneration of ecosystem of lakeside zone around Tai-

hu Lake and planning for its rehabilitatio[J]. Water Resources Protection, 2002, 18(3): 31-36.]

[4] 尹念文, 魏玉涛. 月牙泉的成因分析[J]. 地下水, 2010, 32(2): 20-22. [Yin Nianwen, Wei Yutao. The analysis about the causes of crescent lake[J]. Ground Water, 2010, 32(2): 20-22.]

[5] 孙显科, 吕亚军, 张大治, 等. 风成沙地地形1/10定律的研究与敦煌鸣沙山成因的猜想[J]. 中国沙漠, 2006, 26(5): 704-710. [Sun Xianke, Lv Yajun, Zhang Dazhi, et al. Probe into the "one-tenth" law of aeolian sandy landform and guess at causes of sanddinging Mountain in Dunhuang[J]. Journal of Desert Research, 2006, 26(5): 704-710.]

[6] 刘畅, 成建梅, 苏春利, 等. 敦煌月牙泉地区人工回灌下的地下水动态模拟[J]. 水资源保护, 2013, 29(2): 22-27, 75. [Liu Chang, Cheng Jianmei, Su Chunli, et al. Numerical study of groundwater dynamics with artificial recharge in Yueya Spring area, Dunhuang City [J]. Water Resources Protection, 2013, 29(2): 22-27, 75.]

[7] 李平平, 王晓丹, 黎涛, 等. 敦煌月牙泉湖水位下降治理研究[J]. 西北地质, 2023, 56(5): 165-171. [Li Pingping, Wang Xiaodan, Li Tao, et al. Study on water level decline control of crescent lake in dunhuang[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(5): 165-171.]

[8] 张庆. 浅析敦煌月牙泉恢复补水工程对环境的影响[J]. 中国高新科技, 2021(16): 152-153. [Zhang Qing. Analysis on the environmental impact of the restoration and replenishment project of Dunhuang Yueya spring[J]. China High and New Technology, 2021 (16): 152-153.]

[9] 刘德玉, 贾贵义, 张伟, 等. 甘肃敦煌地区疏勒河尾闾区地下水化学特征及成因分析[J]. 地质论评, 2022, 68(1): 181-194. [Liu Deyu, Jia Guiyi, Zhang Wei, et al. Hydrochemical characteristics and genetic mechanism analysis of groundwater in the tail area of the Shule River, Dunhuang, Gansu[J]. Geological Review, 2022, 68(1): 181-194.]

[10] 李平平, 王晓丹, 陈海龙. 苏干湖湿地与奎屯诺尔湿地之间水力联系研究[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 429-435. [Li Pingping, Wang Xiaodan, Chen Hailong. Study on the hydraulic connection between the Sugan Lake Wetland and the Kuitunnuoer Wetland [J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 429-435.]

[11] 于漫, 于飞, 王东阳, 等. 基于地下水流场和含水介质分析的敦煌月牙泉成因研究[J]. 甘肃地质, 2019, 28(Z1): 80-84. [Yu Man, Yu Fei, Wang Dongyang, et al. Study on the genesis of Dunhuang Crescent Spring based on groundwater flow field and aquifer medium analysis[J]. Gansu Geology, 2019, 28(Z1): 80-84.]

[12] 黎涛, 杨俊仓, 苏春丽, 等. 敦煌月牙泉域沉积环境及泉湖水化学成因分析[J]. 干旱区地理, 2013, 36(5): 812-817. [Li Tao, Yang Juncang, Su Chunli, et al. Strata sedimentary environment and hydrochemistry cause of Lake Grescent Spring in Dunhuang [J]. Arid Land Geography, 2013, 36(5): 812-817.]

[13] 杨俊仓, 施锦, 黎涛. 敦煌月牙泉域风积沙含水层渗透速度示踪试验[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(3): 24-27. [Yang Juncang, Shi Jin, Li Tao. Tracing test for seepage velocity in the aeolian sand aquifer of the Crescent Lake near Dunhuang[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2013, 40(3): 24-27.]

[14] 施锦, 王建红. 机井开采对月牙泉水位的影响及应对措施[J]. 地下水, 2014(6): 57-58. [Shi Jin, Wang Jianhong. Groundwater exploitation influence on Crescent Lake water level and its countermeasures[J]. Underground Water, 2014(6): 57-58.]

[15] 张克存, 屈建军, 牛清河, 等. 敦煌鸣沙山-月牙泉近地表风沙输移路径及强度[J]. 中国沙漠, 2015, 35(3): 521-525. [Zhang Kecun, Qu Jianjun, Niu Qinghe, et al. Near-surface aeolian sand paths and intensity around the Crescent Moon Spring, Dunhuang [J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(3): 521-525.]

[16] 安志山, 张克存, 牛清河, 等. 敦煌鸣沙山月牙泉景区高大沙丘短期动态变化特征[J]. 干旱区研究, 2016, 33(5): 981-987. [An Zhishan, Zhang Kecun, Niu Qinghe, et al. Short-term dynamic change of mega-dunes around the Crescent Spring in Dunhuang [J]. Arid Zone Research, 2016, 33(5): 981-987.]

[17] 庞营军, 屈建军, 牛清河, 等. 敦煌月牙泉景区沙丘表面沙物质的粒度特征[J]. 干旱区研究, 2017, 34(3): 701-706. [Pang Yingjun, Qu Jianjun, Niu Qinghe, et al. Grain size characters of dune surface sediment in the Crescent Spring scenic spot, Dunhuang[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(3): 701-706.]

[18] Meredith K T, Hollins S E, Hughes C E, et al. Temporal variation in stable isotopes(^{18}O and ^{2}H) and major ion concen-trations within the Darling River between Bourke and Wilcannia due to variable flows, saline groundwater influx and evaporation[J]. Journal of Hydrology, 2009, 378: 313-324.

[19] 何建华, 秦文华, 郭嘉兵, 等. 敦煌绿洲地下水微量元素分布特征及其成因[J]. 中国沙漠, 2021, 41(2): 109-119. [He Jianhua, Qiu Wenhua, Guo Jiabing, et al. The characteristics of groundwater trace elements and its controlling factors in Dunhuang Oasis[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(2): 109-119.]

[20] 张华. 地下水平衡与生态演替耦合模型研究——以疏勒河灌区为例[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010. [Zhang Hua. A Study on the Coupling Model of Groundwater Balance and Ecological Succession: Taking the Shule River Irrigation District as an Example[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010.]

[21] 郑文君. 灌溉对大同盆地高砷地下水的影响[J]. 中国资源综合利用, 2017, 35(9): 21-24. [Zheng Wenjun. Effect of irrigation on high arsenic groundwater in Datong Basin[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2017, 35(9): 21-24.]

[22] 林苑. 碱预处理/膨润土协同强化餐厨垃圾厌氧消化及微生物群落结构研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2022. [Lin Wan. Study on the Synergistic Enhancement of Anaerobic Digestion and Microbial Community Structure of Kitchen Waste by Alkali Pretreatment/Bentonite[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2022.]

[23] 段萌语. 大同盆地浅层地下水系统中砷的生物地球化学研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2009. [Duan Mengyu. Biogeochemistry of Arsenic in Shallow Groundwater System of Datong Ba-

sin[D]. Wuhan: China University of Geosciences(Wuhan), 2009.]

[24] 石磊. 鄂西中二叠世孤峰组放射虫及古生产力研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2013. [Shi Lei. A Study on Radiolaria and Paleoproductivity of the Middle Permian Gufeng Formation in Western Hubei[D]. Wuhan: China University of Geosciences(Wuhan), 2013.]

[25] 朱庆增, 孙青, 苏治国, 等. 加速溶剂萃取-同位素质谱分析土壤水的氢氧同位素[J]. 分析化学, 2014, 42(9): 1270-1275. [Zhu Qingzeng, Sun Qing, Su Zhiguo, et al. A soil water extraction method using accelerated solvent extraction technique for stable isotope analysis[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2014, 42(9): 1270-1275.]

[26] 李义. 川东北地区长兴组-飞仙关组碳酸盐岩储层缝隙充填方解石的地球化学特征[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2011. [Li Yi. Geochemical Characteristics of Calcite Filled in Fractures of Changxing Feixianguan Carbonate Rock Reservoirs in Northeastern Sichuan[D]. Wuhan: China University of Geosciences(Wuhan), 2011.]

[27] Li H C, Ku T L. $\delta^{13}C \sim \delta^{18}O$ covariance as a paleohydrological indicator for closed-basin lakes[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1997, 133: 69-80.

[28] 陈建龙. 甘肃金塔盆地地下水水化学特征及其演化模拟[D]. 兰州: 兰州大学, 2019. [Chen Jianlong. Hydrochemical Characteristics and Evolution Simulation of Groundwater in the Jinta Basin, Gansu Province[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.]

[29] 韦玉婷, 罗敏, 袁伟, 等. 四川省泸县玉蟾山地区地下热矿水深循环模式浅析[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2014, 15(1): 76-78, 112. [Wei Yuting, Luo Min, Yuan Wei, et al. Deep circulation model analysis of the geothermal water in Yuchan Mountain Luxian County Sichuan Province[J]. Journal of Changchun Institute of Technology(Natural Sciences Edition), 2014, 15(1): 76-78, 112.]

[30] 刘建刚. 巴丹吉林沙漠湖泊和地下水补给机制[J]. 水资源保护, 2010, 26(2): 18-23. [Liu Jiangang. Recharge mechanisms of lakes and groundwater in Badain Jaran Desert[J]. Water Resources Protection, 2010, 26(2): 18-23.]

[31] 董维红, 苏小四, 谢渊, 等. 鄂尔多斯白垩系盆地地下水水-岩反应的锶同位素证据[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2010, 40(2): 342-348. [Dong Weihong, Su Xiaosi, Xie Yuan, et al. Groundwater-rock interaction in the Ordos cretaceous groundwater basin: Strontium isotope evidence[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2010, 40(2): 342-348.]

[32] 王文博. 基于锶和氢氧同位素的敦煌盆地地下水演化与补给分析[J]. 地下水, 2022, 44(5): 77-79. [Wang Wenbo. Analysis of groundwater evolution and recharge in Dunhuang Basin based on strontium and hydrogen and oxygen isotopes[J]. Ground Water, 2022, 44(5): 77-79.]

[33] 邓吉强, 康卫东, 邢高哲. 神北矿区乌兰木伦河地下水化学特征及其形成作用[J]. 科技创新与生产力, 2018(1): 57-61. [Deng Jiqiang, Kang Weidong, Xing Gaozhe. Hydrochemical characteristics and formation mechanics of groundwater in the Wulamulun River of Shenbei Mining District[J]. Sci-tech Innovation and Productivity, 2018(1): 57-61.]

[34] 王平, 杨亮平, 林晓静, 等. 内蒙古河套平原高矿化咸水分布规律及成因分析[J]. 人民长江, 2018, 49(1): 44-50. [Wang Ping, Yang Liangping, Lin Xiaojing, et al. Distribution characteristics and formation of high mineralized saline groundwater in Hetao Plain, Inner Mongolia[J]. Yangtze River, 2018, 49(1): 44-50.]

[35] Edmunds W, Tyler S. Unsaturated zones as archives of past climates: toward a new proxy for continental regions[J]. Hydro-geology Journal, 2002, 10(1): 216-228.

[36] 姜凌. 干旱区绿洲地下水水化学成分形成及演化机制研究——以阿拉善腰坝绿洲为例[D]. 西安: 长安大学, 2009. [Jiang Ling. Study on the Formation and Evolution Mechanism of Groundwater Hydrochemical Composition in oasis in arid areas——Taking Alashan Yaoba Oasis as an Example[D]. Xi'an: Changan University, 2009.]

[37] 黄天明. 应用环境同位素研究巴丹吉林沙漠地下水补给来源[D]. 兰州: 兰州大学, 2007. [Huang Tianming. Groundwater Recharge Source In Badain Jaran Desert: Evidence from Environmental Isotopes[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2007.]

Analysis of the hydrogeochemical characteristics of the groundwater system in Dunhuang Crescent Lake

LI Pingping[1], GAI Nan[2], WANG Xiaodan[3], YANG Juncang[1]

(1. Gansu Province Key Laboratory of Groundwater Engineering and Geothermal Resources, Geological Environment Monitoring Institute of Gansu Province, Lanzhou 730050, Gansu, China; 2. National Research Center for Geoanalysis, Key Laboratory of Ecological Geochemistry, Ministry of Natural Resources, Beijing 100037, China; 3. Institute of Hydrologic and Engineering Geologic Survey, Gansu Province Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Zhangye 734000, Gansu, China)

Abstract: This study focuses on the Crescent Spring Area at the western end of the Hexi Corridor. Through sample collection experiments, the research systematically analyzed hydrochemical characteristics, environmental isotopes, and hydrogeochemical processes within the study area. The results indicate that mountain water, originating from atmospheric rainfall and glacial meltwater, is the primary source replenishing the diving pool in the area, with a close causal link between the two. Additionally, the local area is affected by the fault structure or cross-flow and receives lateral replenishment from the deep underground runoff in front of the Qilian Mountains. The evaporation effect of groundwater in the Danghe irrigation area is weak, primarily discharging through artificial mining. Other groundwater burial areas mainly discharge through evaporation and transpiration. The chemical composition of groundwater is influenced by the karst filtration involving carbonate and silicate. Key factors controlling groundwater salinity include the dissolution of rock salt, gypsum, and partite rocks, as well as the precipitation of calcite and dolomite, along with evaporation. Various degrees of mixing occur during the water cycle in the basin. Overall, these research findings provide a scientific basis for the ecological protection and restoration of Crescent Lake.

Keywords: Crescent Lake; groundwater systems; water chemical characteristics; environmental isotopes